

大功率激光二极管抽运 Nd·YVO₄ 激光器的特性研究*

李 健** 何京良** 侯 玮 吴 星 许祖彦

(中国科学院物理研究所光物理实验室, 北京 100080)

摘 要 通过对 Nd·YVO₄ 晶体吸收特性的研究, 对激光输出功率、斜效率与抽运功率的关系进行了理论分析, 发现 Nd·YVO₄ 激光器在大功率激光二极管抽运的条件下, 激光斜效率随抽运功率的增加而减小, 实验表明, 理论结果与实验符合得较好。选用 Nd³⁺ 掺杂的原子数分数为 0.5%、通光长度为 5 mm 的 Nd·YVO₄ 晶体, 在抽运功率为 5 W 左右时, 输出功率为 3 W 左右时, 获得了 71.5% 的激光斜效率。

关键词 大功率, 高效率, 激光二极管, 斜效率。

1 引 言

Nd·YVO₄ 晶体具有较宽的吸收带宽和较大的受激发射截面, 特别适用于激光二极管(LD)端面抽运的全固态激光器^[1-3]。近年来已被广泛地用在大功率全固态激光器中^[4-7]。经过理论计算, Nd·YVO₄ 激光器的斜效率极限为 76%。1994 年 Deshazer 报道用 Nd³⁺ 掺杂的原子数分数为 0.1% 的 Nd·YVO₄ 晶体, 在激光器输出功率仅为 1.2 W 时获得了 72% 的激光斜效率^[3], 1998 年中国台湾的 Wu 等人报道用 Nd³⁺ 掺杂的原子数分数为 0.1%、通光长度为 5 mm 的 Nd·YVO₄ 晶体, 在输出功率为 3.3 W 时, 获得 68% 的激光斜效率。本文选用 Nd³⁺ 掺杂的原子数分数为 0.5%、通光长度为 5 mm 的 Nd·YVO₄ 晶体, 在输出功率为 3 W 左右时, 获得 71.5% 的激光斜效率。并通过对 Nd·YVO₄ 晶体吸收特性的研究, 对激光输出功率、斜效率与抽运功率的关系进行了理论分析, 进行大功率激光二极管抽运 Nd·YVO₄ 激光器的实验表明, 理论结果与实验较好符合。

2 理论分析

Nd·YVO₄ 晶体属单轴晶系, 具有很强的双折射性, 有很大的吸收截面和宽的吸收带宽, 最强吸收峰对应的吸收波长是 808.7 nm, 吸收带宽约为 20 nm。Nd·YVO₄ 晶体对 1.064 μm

* 国家高技术研究发展计划资助项目。

** 永久通讯地址: 山东师范大学物理系现代光学实验室, 济南 250014。

收稿日期: 1998-11-09; 收到修改稿日期: 1999-03-09

的能级跃迁是典型的四能级结构, 在纵向抽运的情况下, 大多数激光器能够输出 TEM₀₀ 模, 在谐振腔内基模振荡光所满足的稳态方程为^[8, 9]:

$$\iiint_V \frac{r_p(x, y, z) s_0(x, y, z)}{1 + (c_0/n) \sigma \pi S s_0(x, y, z)} dV = \frac{n\delta}{2L\sigma\pi R}, \quad (1)$$

式中 $s_0(x, y, z)$ 为归一化的腔内光子数密度; S 为腔内光子总数; π 为增益介质上能级的荧光寿命; σ 为受激发射截面; δ 为腔内往返损耗; L 为谐振腔长度; n 为增益介质的折射率; c_0 为真空中的光速; $r_p(x, y, z)$ 为归一化的抽运速率密度函数, R 为抽运速率, 与抽运光功率有如下关系:

$$R = \frac{\eta_p \eta_\alpha P_{in}}{h\nu_p}, \quad (2)$$

设输出镜耦合透过率为 T , 激光输出功率和斜效率的表达式可写为^[9, 10]:

$$P_{out} = Th\nu \frac{c_0}{2L} S, \quad (3)$$

$$\eta_s = \frac{P_{out}}{P_{in} - P_{th}}, \quad (4)$$

式中的 P_{th} 为激光器的阈值功率。在近阈值抽运条件下, 输出功率和斜效率表示为^[8]:

$$P_{out} = \eta_\alpha \frac{h\nu}{h\nu_p} \frac{T}{\delta} \frac{J_1^2}{J_2} (P_{in} - P_{th}), \quad (5)$$

$$\eta_s = \eta_\alpha \frac{h\nu}{h\nu_p} \frac{T}{\delta} \frac{J_1^2}{J_2}, \quad (6)$$

式中 $J_1 = \iiint_V (x, y, z) s_0(x, y, z) dV$, $J_2 = \iiint_V (x, y, z) s_0^2(x, y, z) dV$, J_1^2/J_2 称为重叠效率因子, 表征了抽运光与振荡光的空间重叠程度^[11, 12]。

在强光抽运条件下, 谐振腔内的光强远远强于饱和光强, 满足:

$$\frac{I}{I_s} \gg 1, \quad (7)$$

$$S s_0(x, y, z) \gg \frac{n}{c\sigma\pi}. \quad (8)$$

代入(1)式, 可解出

$$S = \frac{2L}{c} \frac{1}{\delta} R. \quad (9)$$

代入(3)、(4)两式, 即可得出强光抽运时激光器的输出功率和斜效率为:

$$P_{out} = \eta_p \eta_\alpha \frac{\lambda_p}{\lambda} \frac{T}{\delta} P_{in}, \quad (10)$$

$$\eta_s = \eta_p \eta_\alpha \frac{\lambda_p}{\lambda} \frac{T}{\delta} \frac{P_{in}}{(P_{in} - P_{th})}, \quad (11)$$

式中的 λ_p 为抽运光波长, λ 为振荡光波长。由上式可以看出, 在强光抽运条件下, 激光斜效率与谐振腔的损耗 δ 成反比, 而且随抽运功率的增加, $\frac{P_{in}}{P_{in} - P_{th}}$ 的值逐渐减小, 尤其在抽运功率远远大于抽运阈值时, $\frac{P_{in}}{P_{in} - P_{th}}$ 的值趋近于 1。

在强光抽运的条件下, 考虑一种极限情况: 令 $\eta_p = 1$, $\eta_\alpha = 1$, $\frac{P_{in}}{P_{in} - P_{th}} = 1$, 而 $\delta = T$,

则可得最大斜效率:

$$(\eta_s)_{\max} = \frac{\lambda_p}{\lambda}, \quad (12)$$

将 $\lambda_p = 808 \text{ nm}$ 和 $\lambda = 1064 \text{ nm}$ 代入上式, 即得: $(\eta_s)_{\max} = 76\%$ 。可以看出, 对 $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$ 晶体的 $1.064 \mu\text{m}$ 跃迁, 这是理论上能够获得的最大斜效率。实际上 η_p 、 η_α 以及 $\frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{in}} - P_{\text{th}}}$ 均不为 1, 而 δ 由于衍射、吸收等损耗的存在, 不可能等于 T , 因此实际的激光器的斜效率均应小于 76%。

谐振腔内的损耗 δ 一般由三部分组成^[12]: 输出透过率 T 、腔内衍射和腔镜反射不完全等损耗 δ_0 以及吸收损耗 δ_z 。谐振腔确定后, δ_0 与 T 为常数, 而 δ_z 则与晶体的掺杂浓度、通光长度及抽运光功率有关。在强光抽运情况下, 由于抽运功率的增加, 抽运光在晶体内的功率密度增加, 会引起越来越大的热吸收, 甚至出现过饱和吸收, 在抽运光聚焦处会产生强烈的热效应。本文作者经过反复实验, 确定了腔内吸收损耗 $\delta_z(P_{\text{in}})$ 有如下关系:

$$\delta_z(P_{\text{in}}) = C_1 \sqrt{P_{\text{in}}} + C_2 \rho l, \quad (13)$$

其中 C_1 、 C_2 为实验常数, $C_1 = 0.0015 \text{ W}^{-1/2}$, $C_2 = 0.04 \text{ cm}^{-1}$, 均由实验结果拟合给出。由 (13) 式可以看出, $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$ 晶体的掺杂原子数分数不宜太高, 选用低掺杂原子数分数的晶体更容易获得高斜效率。将 (13) 式代入 (10) 式、(11) 式, 即可得到在强光抽运情况下, 激光器的输出功率和斜效率的表达式:

$$P_{\text{out}} = \eta_p \eta_\alpha \frac{\lambda_p}{\lambda} \frac{T}{C_1 \sqrt{P_{\text{in}}} + C_2 \rho l + \delta_0 + T} P_{\text{in}}, \quad (14)$$

$$\eta_s = \eta_p \eta_\alpha \frac{\lambda_p T P_{\text{in}}}{(\lambda C_1 \sqrt{P_{\text{in}}} + C_2 \rho l + \delta_0 + T)(P_{\text{in}} - P_{\text{th}})}, \quad (15)$$

由上式可看出, 在强光抽运条件下, 激光输出功率随输入功率的增加而增加, 斜效率则随输入功率的增加而减小。因此, 要获得高斜效率, 抽运功率不能太大。

以上只计算了近阈值和强光抽运条件下的斜效率的表达式, 由于在近阈值抽运条件和强光抽运条件之间的情况计算十分复杂, 无法给出简单的数学表达式, 只能定性地进行分析。从近阈值抽运和强光抽运条件下的斜效率表达式 (6) 式和 (14) 式可以看出, 在近阈值条件下, 斜效率存在一重叠效率因子 $J_1^2/J_2(J_1^2/J_2 < 1)$, 而强光抽运时斜效率的表达式存在 $\frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{in}} - P_{\text{th}}}$ 因子 ($\frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{in}} - P_{\text{th}}} > 1$), 因此斜效率将随抽运功率的增加向增大的方向变化, 当进入强光抽运范围时, 激光斜效率才随着抽运功率的增加而有所减小。所以, 激光斜效率的极大值应出现在抽运功率刚进入强光抽运范围的时候。目前对强光抽运的范围并没有一个确定的定义, 一般认为抽运功率大于阈值功率的 5 倍以上时, 即符合强光抽运条件。

3 实验与结果

谐振腔采用两镜短腔结构, 端面抽运, 如图 1 所示。晶体的一个通光面作为输入腔镜, 输出镜 M 用凹面反射镜增加谐振腔的稳定性, 曲率半径 $R = 100 \text{ mm}$, 谐振腔长约为 10 mm , 根据 ABCD 矩阵传输理论对谐振腔进行了数值计算, 考虑了激光晶体产生的热透镜效应, 谐振腔在相当宽的范围内稳定。

图中的抽运光源 LD 是美国 OPC 公司生产的 OPC-B015 型带光纤耦合的半导体激光器,

最大输出功率为 15 W, 为全偏振输出; LD 与谐振腔之间的耦合匹配采用准直聚焦系统(GL), 焦距为 30 mm, 传输效率为 89.1%; Nd·YVO₄ 晶体由中国科学院物理研究所晶体组提供, 大小为 3 mm × 3 mm × 5 mm, 通过长度为 5 mm, Nd³⁺ 掺杂的原子数分数为 0.5%, 靠近抽运光的通光面兼作腔镜, 表面镀 1064 nm 高反射和 808

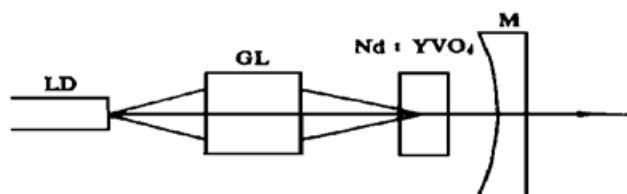


Fig. 1 Schematic diagram of the highly efficient LD pumped Nd·YVO₄ Laser

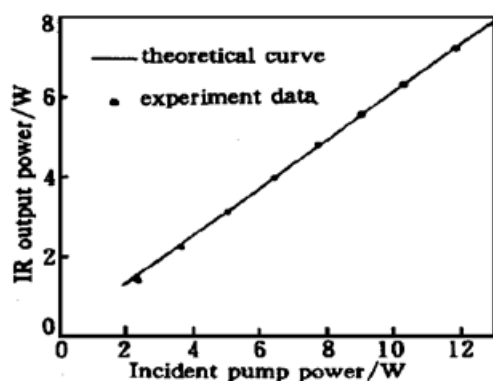


Fig. 2 Curve of the output power as a function of incident pump power of LD pumped Nd·YVO₄ laser

nm 高透射的介质膜, 另一通光面镀 1064 nm 高透射介质膜; 输出腔镜 M 为平凹镜, 曲率半径为 100 mm, 对 1064 nm 波长的透过率为 8%; 功率测量使用中国计量研究院的标准功率计。Nd·YVO₄ 晶体的侧面用铝箔包住装在带有水冷却的紫铜块内, 以保持良好的热接触。

保持激光腔参数不变, 增加抽运激光功率 P_{in} , 测得的阈值功率为 $P_{th} = 0.8$ W, 激光输出功率 P_{out} 随抽运功率 P_{in} 的理论曲线与实验数据如图 2 所示, 激光斜效率的比较如表 1 所示。由图 2 可以看出, 在抽运功率大于 5 W 的情况下, 激光输出功率与理论曲线符合得较好。由表 1 可以看出, 在强光抽运条件下激光斜效率的实验值与理论值也较好符合。在抽运功率为 5 W 左右、输出功率为 3 W 左右时,

获得的平均斜效率为 $71.5\% \pm 1\%$ 。激光输出非常稳定, 从功率计上看不出功率波动。

Table 1. Compare the slope efficiency of experiment with theory

pump power/W	slope efficiency (experiment)/%	slope efficiency (theory)/%
5.1	72.3	73.3
6.46	69.8	70.2
7.78	68.3	68.3
9.06	67.1	67.1
10.32	66.0	66.1
11.86	64.9	65.1

4 讨 论

从图 2 可以看出, 当抽运功率小于 5 W 时, 实验数据与理论值的差别较大, 这是因为该理论曲线是在强光抽运条件下推出的。

由于 Nd·YVO₄ 晶体等效于一个热薄透镜, 实际的激光谐振腔等效为三镜腔, 由 ABCD 矩阵可知, 腔的稳定性相当好, 这与实验结果一致。

Nd·YVO₄ 晶体中 Nd³⁺ 的掺杂的原子数分数对斜效率的影响较大, 文献[3]中使用的 Nd³⁺ 掺杂的原子数分数为 1%, 而实验使用的则是掺杂的原子数分数为 0.5% 的晶体, 理论和实验均表明低掺杂原子数分数的晶体更容易获得高功率和高斜效率激光输出。

以上实验表明: 使用低掺杂原子数分数的 Nd·YVO₄ 晶体, 利用大功率激光二极管抽运获得高效率激光输出, 在抽运功率为 5 W 左右时, 输出功率为 3 W 左右时, 获得 $71.5\% \pm$

1%的平均斜效率。在抽运功率为 11.9 W 时, 激光输出达到 7.2 W。

参 考 文 献

- [1] Kuwano Y, Saito S. Nd:YVO₄ single crystal for LD pumped solid state laser. *Laser Tes.*, 1990, **16**(5) : 616~ 621
- [2] Sasaki T, Kojima T, Yokotani A *et al.*. Single-longitudinal-mode operation and second-harmonic generation of Nd:YVO₄ microchip lasers. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(21) : 1665~ 1667
- [3] Deshazer L. Vanadate crystals exploit diode-pump technology. *Laser Focus World*, 1994, **30**(2) : 88~ 93
- [4] Yelland C, Sibbett W. Stable 4 W CW solid-state green source pumped by fibre-coupled diode-laser arrays. *J. Mod. Opt.*, 1996, **43**(5) : 893~ 901
- [5] Agnesi A, Reali G C, Gobbi P G. 430-mW single-transverse-mode diode-pumped Nd:YVO₄ laser at 671 nm. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1998, **QE-34**(7) : 1297~ 1300
- [6] He J L, Hou W, Zhang H L *et al.*. Continuous-wave output of 5.5 W at 532 nm by intracavity frequency doubling of Nd:YVO₄ laser. *Chin. Phys. Lett.*, 1998, **15**(6) : 418~ 419
- [7] Brignon A, Feugnet G, Huignard J P. Compact Nd:YAG and Nd:YVO₄ amplifiers end-pumped by a high-brightness stacked array. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1998, **QE-34**(3) : 577~ 585
- [8] Laporta P, Brussard M. Design criteria for size optimization in diode-pumped solid-state lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1991, **27**(10) : 2319~ 2326
- [9] Fan T Y, Byer R L. Diode laser-pumped solid-state lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1988, **24**(6) : 895~ 912
- [10] Kubodera K, Otsuka K. Single-transverse-mode LiNdP₄O₁₂ slab waveguide laser. *J. Appl. Phys.*, 1979, **50**(5) : 653~ 659
- [11] Digonnet M J F, Gaeta C J. Theoretical analysis of optical fiber laser amplifiers and oscillators. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(3) : 333~ 342
- [12] Chen Y F, Huang T M, Kao C F *et al.*. Optimization in scaling fiber-coupled laser-diode end-pumped lasers to higher power: Influence of thermal effect. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1997, **QE-33**(8) : 1424~ 1429

Performance of a Laser-Diode Pumped High Efficient Nd:YVO₄ Laser

Li Jian* He Jingliang* Hou Wei Wu Xing Xu Zuyan

(Optical Physics Laboratory, Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

(Received 9 November 1998; revised 9 March 1999)

Abstract The absorption characteristics of the Nd:YVO₄ crystal and the relations between the laser output power or the slope efficiency and the input power are studied. It is found that the slope efficiency of Nd:YVO₄ laser dropped with the input power raised under the condition of a high power pumped. The average slope efficiency of 71.5% is obtained with a Nd:YVO₄ crystal of 0.5% doped concentration x and pumped by about 5 W, the output power of the laser is about 3 W.

Key words high power, highly efficient, laser-diode, slope-efficiency.

* Permanent address: Modern Optical Laboratory, Department of Physics, Shandong Normal University, Jinan 250014